

精密铸造全自动真空沾浆桶设计与应用

白晓松, 张庆武, 张鹏伟, 王玫君

(中航工程集成设备有限公司, 北京 102206)

摘要: 采用真空沾浆技术能够解决型壳面层气泡夹杂问题, 大幅提高铸件表面质量。本文介绍了一种全自动真空沾浆桶的设计与应用, 首先分析了真空沾浆桶需要具备的性能参数和技术要求; 其次完成了真空容器结构的整体设计, 并采用ANSYS软件对真空容器的稳定性进行了校核计算和优化设计; 最后, 完成真空沾浆的原型机制造。测试表明, 原型机满足各项设计指标要求。全自动真空沾浆桶的研制成功实现了国内集柔性、全自动化、良好真空性能等特性于一体的真空沾浆装置的突破。

关键词: 精密铸造; 真空沾浆; 结构设计; 稳定性分析; 有限元分析

熔模铸造在高精度、复杂结构铸件的成形中具有不可替代的作用, 近年来铸件已经从传统意义上的毛坯升级为近净成形整体零部件, 对铸件表面质量要求越来越高^[1]。在熔模铸造生产中, 涂料的涂挂工艺直接影响铸件表面质量。涂料有面层、过渡层与加固层之分, 其中面层涂料起到精确复制蜡模表面形态的作用, 直接影响铸件的表面质量, 因此面层涂料的涂挂作业极大影响精铸件品质。

面层浆料在配制过程中需加入一定的润湿剂, 使得涂料表面张力下降, 搅拌过程中易将空气卷入形成气泡, 虽然在涂料配置过程中加入消泡剂, 但是无法保证消除全部气泡。在涂挂涂料时, 气泡易残留在模壳槽、拐角处, 造成型壳表面存在珠形孔洞, 浇注时金属液进入, 形成铸件表面上凸出的金属豆缺陷, 影响铸件质量^[2]。

真空沾浆装置可用于消除蜡模沾浆过程中产生的夹杂气泡, 但是目前市面上真空沾浆装置存在一定的缺陷, 主要体现在: 真空沾浆装置只是实现单机自动化, 尚未实现与机械手配合; 同一设备无法对不同规格的模壳进行沾浆, 并保证其沾浆效果最佳; 密封处缺少必要的防护, 维护不便等。本研究设计的真空沾浆桶实现了国内集柔性、全自动化、良好真空性能等于一体的真空沾浆装置的突破。

1 真空沾浆技术及关键指标

1.1 真空沾浆技术机理

在大气环境下沾浆, 常常局部会产生气泡积存, 包括配置过程中产生的气泡, 以及沾浆过程中新产生的气泡。在配制面层硅溶胶涂料时, 由于硅溶胶属于水基型粘结剂, 而模组具有憎水性, 因此向涂料中加入润湿剂, 降低涂料与模组之间的界面张力, 促使涂料与模组附着在一起。加入润湿剂后, 涂料表面张力下降, 搅拌过程中易将空气卷入形成气泡^[3-4]。

在真空环境下, 涂料表面压力减小, 涂料中气泡溢出能力增大, 同时, 配合均匀搅拌, 涂料中气泡所受阻力减小, 更加利于气泡的溢出。而且在涂制完成后真空破除时, 由于大气压力涂料表面压力迅速增加, 使涂料向模组细微处运动, 利于形成表面均匀、致密的面层。因此利用真空沾浆技术, 能够提高涂料对熔模模组的浸润性, 解决模壳面层气泡夹杂问题, 确保浆料均匀地涂覆和填充复杂细节, 包括孔、槽、狭窄的通道和其他细小开口, 形成致密的耐火涂层, 使铸件表面质量得以

作者简介:

白晓松 (1983-), 男, 高级工程师, 主要研究领域是熔模精密铸造非标自动化产线及各类精铸设备。

E-mail: 13521760506@126.com

通讯作者:

王玫君, 女, 工程师。E-mail: hit_wangmeijun@163.com

中图分类号: TG249.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2024)

09-1280-06

收稿日期:

2024-03-19 收到初稿,

2024-04-03 收到修订稿。

大幅提高^[5]。

1.2 全自动真空沾浆技术要求

本研究设计的全自动真空沾浆桶适用于模壳面层沾浆，尤其适用于铸件表面质量要求高的情况。通过机械手配合，实现自动抽真空、沾浆、挂架、模壳移动及破真空等操作，辅以人性化操作界面，达到精密铸造制壳全过程自动化控制目的；除此之外，浆液温度过高或者过低都会导致浆液失效，本设备可实时控制浆液温度在一定的范围内，保证模壳最佳沾浆效果。

随着传统制壳生产线向着柔性生产线过渡，本设计赋予真空沾浆桶高度柔性，适用于不同规格尺寸模

组的真空沾浆操作，快速响应不同规格工件的沾浆要求。与目前市场上的真空沾浆装置对比，具有一定柔性、真空度高、抽真空效率高、自动化程度高、操作维护更便捷等特点。

1.3 全自动真空沾浆设备关键指标

由于真空容器使用情况特殊，需要根据容器的强度、稳定性、密封性等工程要求，对容器的几何尺寸、壁厚等进行设计^[6]。技术参数是结构设计的前提，设计关键指标要求如表1所示。根据实际需求，确定真空容器实际应用时要达到5 000 Pa的真空度，依据GB/T 3163—2007《真空技术术语》中对真空区域的定义，该真空度取值属于低真空范围。

表1 设备参数表
Table 1 Equipment parameter list

适用模壳尺寸/mm	浆桶尺寸/mm	浆桶转速/(r·min ⁻¹)	真空度/Pa	温控	辅助功能
< 800	直径1 000	内桶转速0~50 连续可调	2 min内 达到5 000	30 min内温度控制满足 18~22 ℃	停转检测、自动开盖、 自动补水等

2 整体设计及关键部件设计

2.1 整体设计

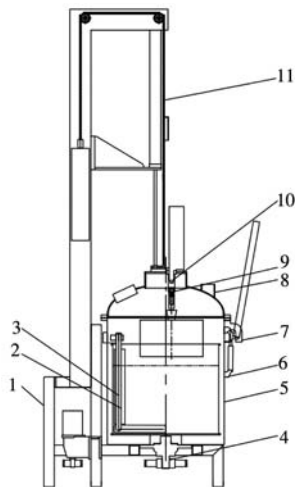
真空沾浆装置是通过机械手将模壳挂到容器内的挂架上，容器密封后，采用真空泵抽真空，提供沾浆所需的真空环境，通过液位和温度传感器对浆液实时检测反馈，水冷系统置于搅拌桨内，冷水通过搅拌桨与浆液进行热量交换，通过PLC关闭冷水开关实现对浆液的温度控制。沾浆结束后破真空，再通过机械手将模壳取出进入下一步工艺流程。

真空沾浆桶主要由支架、模壳顶紧装置、桶盖升降装置、模壳挂架进给装置，翻转防护盖板，抽真空系统、传动组件、桶体组件、搅拌组件、冷却组件、检测组件等组成，其整体结构如图1所示。

支架固定在地面上，用于各个组件的连接和支撑。

桶体组件和桶盖升降装置为真空沾浆桶的主要部件，构成了真空容器，桶体组件为圆筒状外形，主要包括耐压外桶、内桶以及支撑桶的底托。浆液在内桶内进行搅拌，外桶起到防护耐压作用，外桶上边缘处设置挡边，从而避免旋转过程中内桶内浆液溅出。桶盖上设有观察窗，方便观察沾浆过程。

桶盖升降装置主要由桶盖、升降气缸、导向光轴、翻转防护盖板组成，气缸头部与桶盖连接。升降气缸通过压缩空气可将桶盖提起，导向光轴可使桶体在上升过程中能够沿光轴垂直运动。特别的，桶盖通过链条和配重相连，将桶盖向上拉升时，此时桶盖



1. 支架 2. 搅拌组件 3. 冷却组件 4. 传动系统 5. 桶体组件
6. 翻转防护组件 7. 真空系统 8. 检测组件 9. 模壳挂架进给装置
10. 模壳顶紧装置 11. 桶盖升降装置

图1 真空沾浆桶结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the vacuum slurry tank

配重能够有效减少气缸负荷，结构可靠性高，升降动作更加平稳；另外，在桶盖上升到上限位时，翻转防护盖板翻转下来对其进行防护，防止浆料滴落影响密封。在真空罐的口沿密封处加翻转遮挡防护装置，使密封面始终保持洁净。滴浆影响真空密封问题。防护环对桶体口沿的顶端面起到防护的作用，翻转防护盖板在桶盖升起后翻转至罐口位置进行防护，在桶盖下降时翻转至掀开位置。避免取出工件时断续滴落的浆

料掉落至中间密封环的顶端面上,不但清理方便,还保障了中间密封环与盖板盖合时的密封性。

模壳挂架进给装置固定在桶盖上,采用伺服电机、梯形丝杠和直线导轨、伸缩杆组配合传动。伺服电机旋转运动通过梯形丝杠和直线导轨使模壳挂架产生上升和下降运动。丝杠的作用是将旋转运动转化为直线运动,导轨的作用是支承运动构件并使其按规定方向运动,传动精度高。模壳挂架上端与模壳挂架进给系统的伸缩杆连接。

模壳顶紧装置装在模壳挂架进给系统的伸缩杆中,由顶紧气缸、顶紧杆、顶紧头及相应的密封装置组成。顶紧气缸通入压缩空气后通过顶紧杆和顶紧头将压力传递给模壳工件,使其压紧固定,防止沾浆过程中晃动。

传动组件是驱动内桶旋转的部件,由三联皮带、三槽皮带轮、驱动轴、轴承座及相应的密封装置组成,将电机的转动转化为内桶的旋转;采用带传动方式,并配以密封装置,通过带轮将动力传给浆旋转部件,皮带传动运行平稳、有过载保护功能,结构相对简单,调整方便,两轴中心距调节范围较大。

搅拌组件由侧浆和底浆组成,固定在耐压桶体的内壁上,用于搅拌浆料,使浆料各个组成料均匀悬浮,不会沉淀。侧浆是中空的,用于通循环冷却水为浆料降温;冷却水管穿过桶体后通过软管与浆液搅拌浆的侧浆连接。

检测组件主要包括浆液高度实时测量装置和浆液温度实时测量装置。测量装置固定在桶盖上,由防护罩、激光液位传感器和红外测温传感器组成。激光液位传感器通过激光测距方式检测浆液高度,传感器测量范围0~3 m,测量精度 ± 0.1 mm。防护罩可有效保护激光液位传感器不受损坏。红外测温传感器实时测量浆液温度,并反馈至控制系统,与冷却组件联动,实现温度精确控制在18~22℃内。

真空系统包括真空泵、真空阀门、排气过滤装置等。真空系统能够实现对真空度的精确控制,并保证在沾浆过程中稳定在某一真空度。真空泵在生产过程中一直处于工作状态,沾浆过程中通过真空泵保持真空度,真空泵的选择主要依据具体工艺,具体是指真空度和流量两个参数,对应真空泵极限压力和抽速两个参数,按照设计要求,真空泵需在2 min内达到5 000 Pa的真空度,最终确定真空泵型号为德国贝克真空泵U5.201,为油式旋片式真空泵。

2.2 全自动真空沾浆流程

(1) 初始状态时,内桶以一定的转速旋转,浆料温度控制在一定范围内,浆液液位控制在18~22℃内;

(2) 机械手抓取模壳挂到真沾浆桶内的挂架上,机械手退出,模壳顶紧装置将挂架顶紧;

(3) 桶盖关闭,桶盖和桶体之间形成密闭环境;

(4) 真空系统工作,对桶体内进行抽真空,2 min达到真空度5 000 Pa;

(5) 模壳沾浆过程根据实际工艺需求,主要有两种方式:一次浸浆并在浆料内停留一段时间,或者模壳在真空容器内进行上下、自转等动作沾浆。当采用一次浸浆时,提前通过液位检测组件对真空罐内的浆液高度进行测量,结合模壳的高度,计算模壳浸浆深度,计算结果反馈至系统控制程序,控制模壳挂架进给装置运动,使不同规格的模壳均能够处于最佳的浸浆位置。当驱动模壳在真空容器内运用上下、自转等动作沾浆时,需要动态判断调整浸浆深度,控制系统实时检测桶内浆液液位,指导调整模壳挂架进给装置。两种情况下均能够保证模壳沾浆效果,进而提高了铸件表面质量;

(6) 沾浆完成,真空环境解除,压力达到大气压后开启桶盖,模壳离开浆液,通过模壳挂架进给装置,将模壳调整至机械手取件适宜高度,机械手将模壳取走,进行下一道工序。沾浆全过程自动化,操作方便,维护便捷,智能控制系统通过PLC实时采集温度、浆液液位、各逻辑信号及报警信息,通过操作面板展示,实时监控沾浆过程,确保设备安全稳定运行,显著节省人力资源。

2.3 关键部件设计

桶体组件作为真空容器,是真空沾浆桶主要部件之一,其主要作用是提供一个真空环境,以其他相关组件的支撑。在工作状态下,容器外部承受大气压及自重作用,内部为真空,为保障真空沾浆顺利进行,有必要对真空桶体结构进行可靠设计和优化改进。分别按照结构强度规则设计和结构强度有限元分析设计两种方式,并利用ANSYS软件对壳体壁厚进行了优化设计,使得材料得到了有效利用。

2.3.1 真空桶体壁厚设计计算

大多数真空容器的壳体都是圆筒形的,主要是因其便于制造且强度好,本设备也采用圆筒壳体。圆筒结构尺寸参照《真空设计手册》中给出的圆筒形壳体内径推荐值,结合实际工况下模壳尺寸来确定,厚度是压力容器最主要的结构参数,是在载荷条件下,保证结构强度及使用寿命的基本条件。首先确定的厚度是计算厚度,再加上壁厚附加量得到计算最终壁厚^[7]。计算方法则参照《真空设计手册》中的公式进行初步计算^[8]。

根据《真空设计手册》中圆筒形壳体的计算方法,只承受外压,壳体壁厚计算公式为:

$$S_0=1.25D_B\left(\frac{-G^2\times t^{2/3}}{R}\right)\left(\frac{p}{E_t}\cdot\frac{L}{D_B}\right)^{0.4}\quad(1)$$

式中: S_0 为圆筒计算壁厚, mm; D_B 为圆筒内径, mm; p 为外压设计压力, MPa, 真空容器选择 $p=0.1$ MPa; L 为圆筒计算长度, mm; E_t 为材料温度为 t 时的弹性模量, MPa。

圆筒的实际壁厚应为:

$$S=S_0+C\quad(2)$$

式中: S 为圆筒实际壁厚, mm; S_0 为圆筒计算壁厚, mm; C 为壁厚附加量, mm。

$$C=C_1+C_2+C_3\quad(3)$$

式中: C 为壁厚附加量, mm; C_1 为钢板的最大负公差附加量, mm, 一般均取0.5; C_2 为腐蚀裕度, mm, 单面腐蚀取 $C_2=1$ mm, 双面 $C_2=2$ mm; C_3 为封头冲压时的拉伸减薄量, mm, 对于不经冲压的元件, 取0。

计算时,另需满足以下两个条件:

$$1\leq\frac{L}{D_B}\leq 8\quad(4)$$

$$\left(\frac{p}{E_t}\cdot\frac{L}{D_B}\right)^{0.4}\leq 0.523\quad(5)$$

确定真空容器设计计算参数如表2。经过上述计算,初步确定真空容器壁厚为5.4 mm。

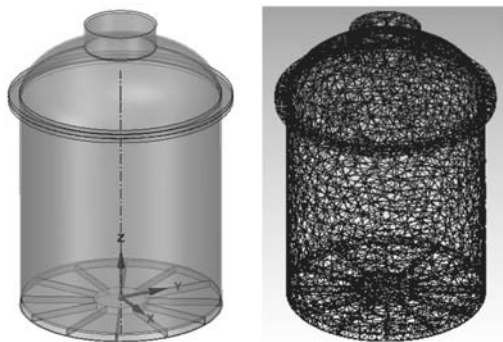
表2 真空容器设计计算参数
Table 2 Design calculation parameters

设计外压强 p/MPa	设计温度 $t/^\circ\text{C}$	圆筒内径 D_B/mm	圆筒计算长度 L/mm	材料温度为 t 时的 弹性模量 E_t/MPa	壁厚附加量 C/mm	圆筒计算壁 厚 S_0/mm	圆筒实际壁厚 S/mm
0.1	25	1 000	1 000	193 000	1.5	3.9	5.4

2.3.2 真空桶体壁厚设计校核

仿真分析已经成为设备设计质量评估的重要环节,采用计算机辅助技术对关键部件进行仿真分析,以优化设备关键结构设计。本研究采用ANSYS软件对真空容器进行结构强度校核,结合设计工况和结构形式进行数值模拟^[9]。壳体外表面承受大气压力,内部在真空状态下操作。考虑自重对结构强度的影响,取重力加速度 $g=9.8\text{ m/s}^2$,方向竖直向下;真空桶体上、下、左、右、前、后6个面在大气压强的作用下承受均布面载荷,压强为大气压强,为101.325 kPa。材料属性按Q235A的材料属性设置,其中弹性模量取 2×10^5 MPa,泊松比取0.3,屈服极限取235 MPa,强度极限取375 MPa,许用应力取138 MPa,密度取 $7\,850\text{ kg/m}^3$ 。模型及划分网格后的图形如图2所示^[10]。

壁厚为6 mm的沾浆通的结构计算结果如图3所示,



(a) 真空沾浆桶结构示意图 (b) 模型划分网格

图2 真空沾浆桶结构示意图及模型划分网格

Fig. 2 Structure diagram of vacuum slurry tank and meshing of the model

从图3a的等效变形分布云图可以看出,最大变形值为0.145 4 mm;从图3b的等效应力云图可以看出,最大应力值位于桶盖顶部,为43.79 MPa。

本研究使用ANSYS软件建立了多种壁厚的有限元模型,壁厚从5 mm变化至10 mm,步长1 mm,分析了真空容器的变形,并得到了壁厚与变形关系曲线,如图4所示,为真空容器的优化设计提供了较为准确的理论依据。基于不同壁厚的真空容器最大变形量数据,从中选择一个强度符合要求,变形量较小,并尽可能节约设计成本的一种模型。

从图4的曲线中可以看出,变形量与壁厚并不呈线性变化关系。壁厚值为6 mm时,变形量较前一壁厚值,有较为明显的下降;同时,从6 mm以后增加壁厚值,变形量影响逐渐减小,且壁厚为6 mm时,变形量为0.145 4 mm,最大应力为43.7 MPa,最大应力和变形量均在许用范围内,因此强度符合设计要求,最终确定壁厚为6 mm。采用ANSYS软件对压力容器设备质量随壁厚的变化进行迭代运算,在满足约束条件的情况下得到最优设计结构,减轻了设备质量,节约了设计时间,实现设备轻量化及优化设计。

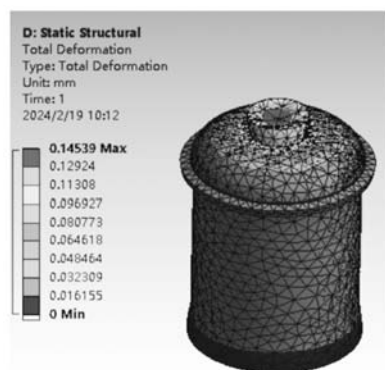
3 原理样机与试验测试

3.1 原理样机

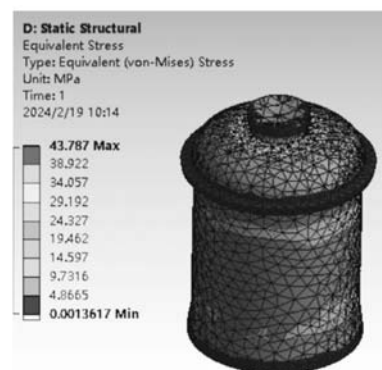
目前该设备已经在现场中得到了应用,如图5所示为真空沾浆桶实物图。

3.2 试验测试

针对该真空沾浆桶的试验包括两方面:真空性能



(a) 变形量模拟结果



(b) 应力分析结果

图3 变形量及应力分析结果

Fig. 3 Deformation and stress analysis results

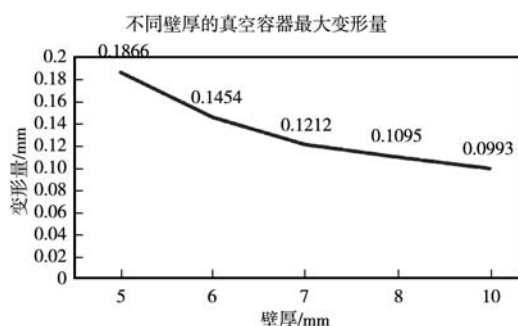


图4 不同壁厚的真空容器变形量

Fig. 4 Deformations of vacuum container with different wall thicknesses



(a) 开启真空泵1 min后

(b) 关闭真空泵2 h后

图6 真空压力表显示

Fig. 6 Vacuum gauge reading



(a) 真空沾浆桶桶盖关闭状态 (b) 真空沾浆桶桶盖开启状态

图5 真空沾浆桶

Fig. 5 Vacuum slurry tank

试验和密封保压试验，真空性能试验主要是测试真空容器能够达到的极限真空度。选用高精度抗震真空压力表进行压力测量，开启真空泵1 min后，真空压力表测得真空度能够达到1 000 Pa，极限真空度高于设计要求的5 000 Pa，接着关闭真空泵，进行保压试验，2 h后真空度为2 200 Pa。如图6a所示为开启真空泵1 min后压力表显示情况，如图6b所示为关闭真空泵保压2 h后的压力表显示情况。

根据试验结果，真空沾浆桶的真空组件抽真空速率快于设计要求，极限真空度满足真空度要求，且结构密封性能良好，能够持久保持真空环境，满足设计要求。

4 结论

(1) 所研制沾浆桶可在1 min内抽真空至1 000 Pa，且真空密封性良好，2 h保压效果为真空度从1 000 Pa到2 200 Pa。翻转防护设计保证密封面始终保持洁净，装置便于维护，密封性得到保证，节能增效，保障了铸件高质量成形和连续生产。

(2) 真空沾浆桶具备柔性，使不同规格的模壳均处于最佳的浸浆位置，快速响应不同规格工件的沾浆要求，适用于真正的自动化工业化生产线，提高了生产效率。

(3) 真空沾浆桶与机械手配合，实现精铸制壳全过程自动化。智能控制系统通过PLC实时采集温度、浆液液位、各逻辑信号及报警信息，通过操作面板展示，实时沾浆过程监控，确保设备安全稳定运行，节省人力资源。

参考文献:

- [1] 吕志刚. 我国熔模精密铸造的历史回顾与发展展望 [J]. 铸造, 2012, 61 (4): 347-356.
- [2] 陈国桢, 肖可则, 姜不居. 铸件缺陷和对策手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [3] 姜不居, 闫双景, 周泽衡. 硅溶胶制壳工艺探讨 [J]. 特种铸造及有色合金, 1996 (6): 28-32.
- [4] 宋浩, 韩冬, 赵军, 等. 钛合金熔模精密铸造技术的发展现状 [J]. 铸造, 2020, 69 (12): 1304-1311.
- [5] 赵明汉, 周波, 肖玉贵, 等. 精铸面层涂料真空涂覆工艺 [C]//上海有色合金及特种铸造国际会议, 1998.
- [6] 黄本诚, 陈金明, 祁妍, 等. 真空容器设计 [J]. 中国空间科学技术, 2002 (3): 8-14.
- [7] 刘俊明, 梁海峰. 对GB 150中计算厚度概念的商榷 [J]. 化工设备与管道, 2015, 52 (1): 20-22.
- [8] 达道安, 邱家稳. 真空设计手册 [M]. 3版. 北京: 国防工业出版社, 2004
- [9] 毛荣大, 李博, 刘元亮, 等. 基于ANSYS的异型真空容器结构分析与改进 [J]. 真空与温, 2018, 24 (5): 348-352.
- [10] 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法 [M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2003.

Design and Application of Automatic Vacuum Slurry Tank in Investment Casting

BAI Xiao-song, ZHANG Qing-wu, ZHANG Peng-wei, WANG Mei-jun
(AVIC CAPDI Integration Equipment Co., Ltd., Beijing 102206, China)

Abstract:

Applying vacuum slurry dipping technology can solve the problem of bubble inclusion on the shell surface layer and greatly improve the surface quality of castings. This paper introduced the design and application of a kind of automatic vacuum slurry tank. At first, the performance parameters and technical requirements of the vacuum slurry tank were analyzed. Secondly, overall design of the vacuum slurry tank structure was completed, and the verifying calculation and optimization design were carried out for the stability of the vacuum vessel by using of ANSYS software. Finally, the prototype of the vacuum slurry tank was completed. The test shows that the prototype meets all of design objective requirements. The successful development of full-automatic vacuum slurry tank has achieved a breakthrough in domestic vacuum slurry dipping device which integrates flexibility, full automation and good vacuum performance.

Key words:

investment casting; vacuum slurry dipping; structural design; stability analysis; finite element analysis
